

Измерение краевых полей ондулятора с переменным периодом

Еркович Степан Сергеевич

Физический факультет. Практикум электричества и магнетизма. Курсовая работа.

Группа № 18345, 3 семестр, 2019 год.

Научный руководитель:

Горбачев Я.И.

Аннотация

Целью работы являлось исследование и моделирование движения пучка релятивистских электронов, проходящих через прибор, «ондулятор», со знакопеременным поперечным периодическим магнитным полем. С целью повышения эффективности работы ондулятора исследовались явления краевых эффектов и метод их компенсации. Для этих целей был использован специальный стенд, получены данные о напряженности поля в рабочей зоне ондулятора. На основании полученных данных построены графики характеристик. Изучены и протестированы методы компенсации краевых эффектов. Проведены компенсационные работы и изучены зависимости отклонений пучка от вида проведенной компенсации. Результаты явно показывают уменьшение отклонений пучка, требуемое для эффективной работы лазера на свободных электронах.

Ключевые слова: ондулятор, лазер на свободных электронах, компенсация краевых эффектов.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Еркович Степан Сергеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

«Измерение краевых полей ондулятора с переменным периодом»

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18345

Научный руководитель:

Горбачев Я.И.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к.ф.-м.н. Симонов А.А.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

к.т.н. Астрелин В.Т.

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск, 2019

Аннотация

Целью работы являлось исследование и моделирование движения пучка релятивистских электронов, проходящих через прибор, «ондулятор», со знакопеременным поперечным периодическим магнитным полем. С целью повышения эффективности работы ондулятора исследовались явления краевых эффектов и метод их компенсации. Для этих целей был использован специальный стенд, получены данные о напряженности поля в рабочей зоне ондулятора. На основании полученных данных построены графики характеристик. Изучены и протестированы методы компенсации краевых эффектов. Проведены компенсационные работы и изучены зависимости отклонений пучка от вида проведенной компенсации. Результаты явно показывают уменьшение отклонений пучка, требуемое для эффективной работы лазера на свободных электронах.

Оглавление

Введение.....	4
Устройство ондулятора на постоянных магнитах	4
Фокусировка в ондуляторе.....	6
Краевой эффект и компенсация края	6
Измерение магнитного поля датчиком Холла.....	9
Обработка данных	10
Компенсация краевого эффекта в ондуляторе Новосибирского лазера на свободных электронах.	10
Результат до компенсации.....	11
Результаты после компенсации	12
Заключение	13
Список используемой литературы	14
Приложение	15

Введение

Ондулятор – устройство со знакопеременным поперечным магнитным полем. Они используются в лазерах на свободных электронах для преобразования кинетической энергии заряженных частиц в энергию электромагнитных волн когерентного синхротронного излучения, длину которых можно подстраивать физическими параметрами ондулятора.

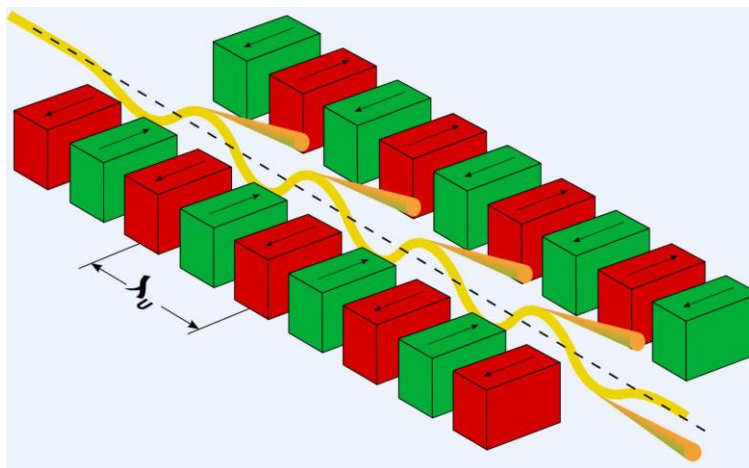


Рис. 1. Упрощенная схема устройства ондулятора.

Для эффективной передачи энергии необходимо обеспечить поле ондулятора, образующее окolorезонансные силы, действующие на электронный пучок. Это условие выполняется, когда длина волны излучения λ удовлетворяет следующему соотношению:

$$\lambda \approx \frac{\lambda_u}{2\gamma^2}, \quad (1)$$

где γ – Лоренц фактор пучка, а λ_u – период ондулятора. Из этого соотношения видно, что длина излучаемых волн может плавно регулироваться простым перестроением периода ондулятора.

Устройство ондулятора на постоянных магнитах

Ондулятор представляет собой кластерную структуру из магнитных ячеек. Каждая ячейка, изображенная на рис.2, состоит из двух блоков, а блок из двух постоянных редкоземельных магнитов.

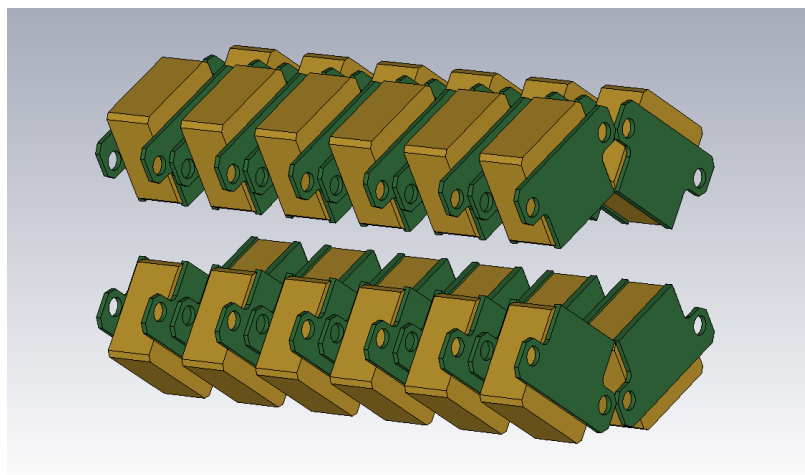


Рис. 2. Схема шести кластеров.

Блоки в одном кластере имеют разную ориентацию магнитов, что позволяет получить структуру, представленную на рис.1. В установке использованы магниты из NdFeB с характерными параметрами (линейные размеры, вес, намагниченность), оптимизированными для получения максимальной амплитуды поля на оси при минимальном периоде. Схема ориентации кластеров, схематично показана на рис.3.

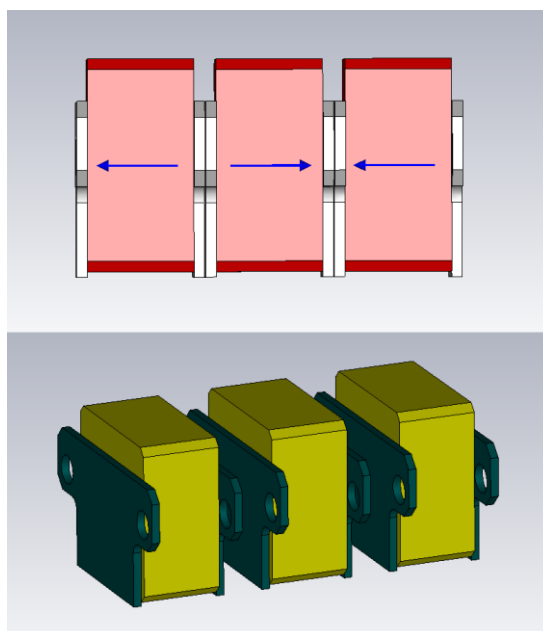


Рис. 3. Схема ориентации магнитов в кластере.

Период ондулятора регулируется изменением расстояния между первым и последним кластером. Промежуточные элементы сами занимают координаты потенциальных ям, согласно их количеству. Количество и расположение

магнитов в одном блоке связано с необходимостью центровать пучок электронов. Такая конфигурация обеспечивает рост амплитуды магнитного поля при отклонении пучка в любом направлении.

Фокусировка в ондуляторе

Как было описано выше ромбовидный профиль магнитных кластеров используется для фокусировки электронного пучка в обоих направлениях, перпендикулярных оси ондулятора. На Рис.4. видно, что поле усиливается при отклонении по X координате, что позволяет центрировать пучок по этой оси.

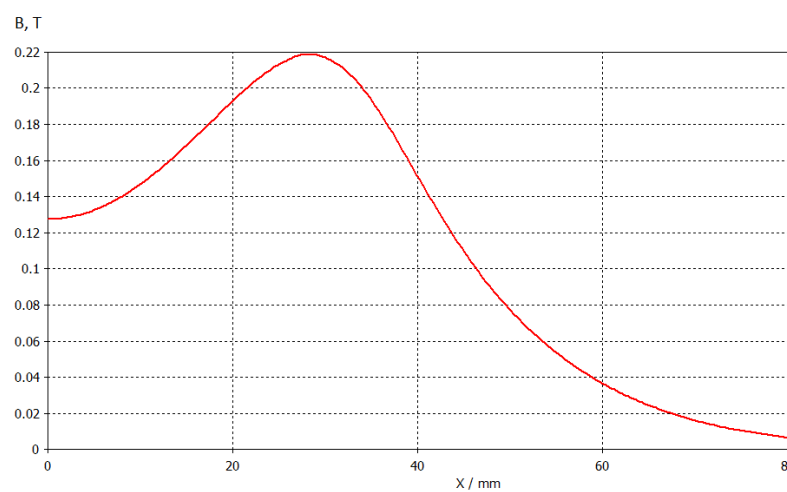


Рис. 4. Зависимость вертикального поля от горизонтальной координаты X.

Краевой эффект и компенсация края

Электронный пучок, попадая в регулярную часть ондулятора, не должен иметь смещения по углу и координате относительно оси для эффективной работы лазера, в котором ондулятор используется. Это условие обеспечивает перекрытие электронного пучка с собственной модой оптического резонатора. Основная оптическая мода представляет собой Гауссовский пучок. Краевые эффекты вызывают отклонение пучка в некомпенсированном поле первого магнита, Рис.6, возникающем из-за конечности размера ондулятора.

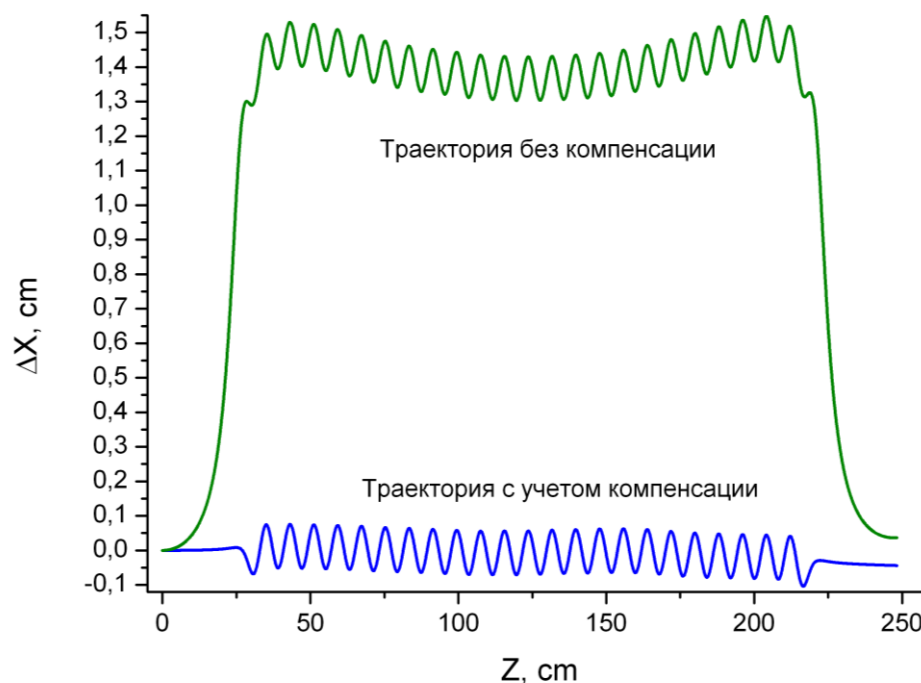


Рис. 6. Пример теоретической траектории с компенсацией краевых эффектов и без нее.

Добиться минимизации первого и второго интеграла (6) поля при входе пучка в регулярную часть ондулятора для наперед заданного периода можно разными способами. Среди них изменение периода первых и последних кассет или физическое ослабление этих кассет. Оба варианта компенсируют краевой эффект для наперед заданного периода. Вариация периода приводит к нарушению этой оптимизации. Трехмерное моделирование системы показало, что траектория пучка испытывает больше краевых искажений при малых периодах. Ввиду этого, компенсация была проведена для минимального периода. Проверка показала, что при увеличении периода до максимальных значений установки, нарушение оказалось не существенным.

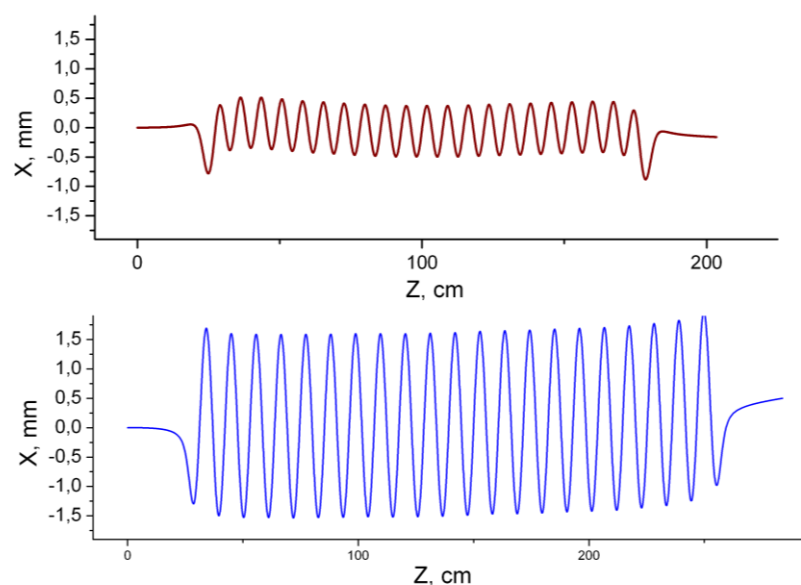


Рис. 7. Пример траектории с компенсацией краевых эффектов при минимальном (сверху) и максимальном периодах ондулятора.

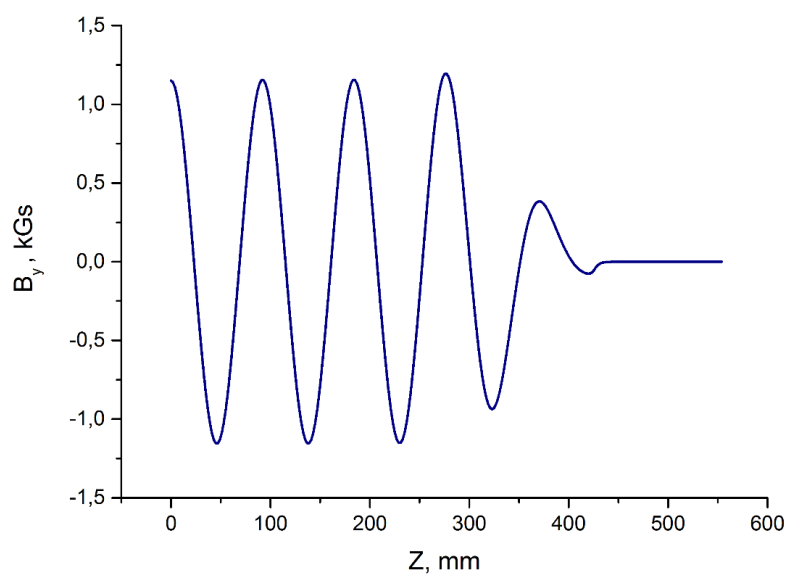


Рис. 8. Пример поля при скомпенсированных краевых эффектах.

Для дальнейшей тонкой настройки компенсации могут быть использованы специальные подкладки под магниты из магнитомягкого материала, как один из способов физического ослабления, Рис.9.

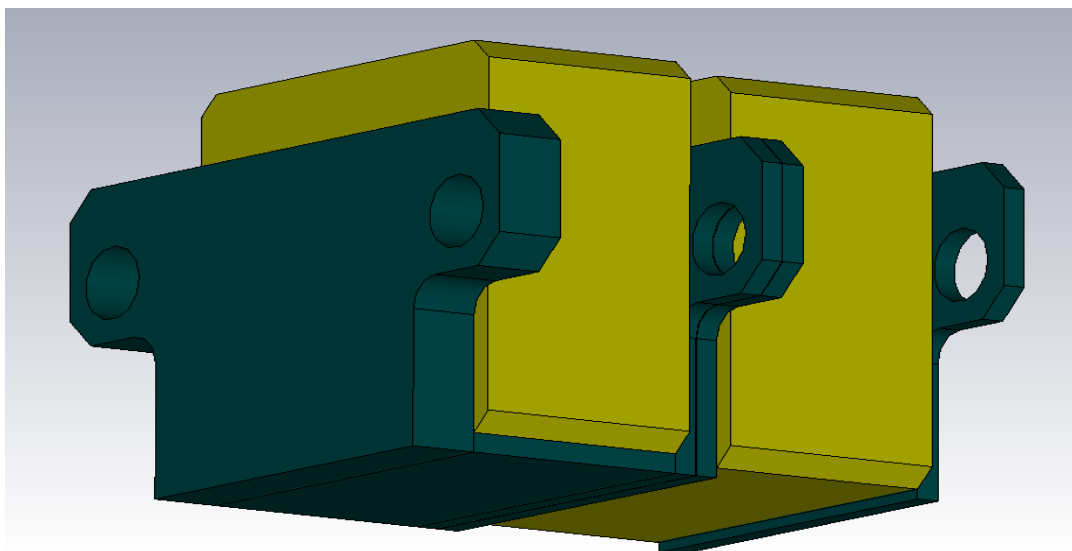


Рис. 9. Тонкая настройка поля подкладкой.

Измерение магнитного поля датчиком Холла.

Для измерения поля и дальнейшего моделирования поведения пучка использовался стенд, в котором шаговый двигатель протягивал каретку с датчиком Холла вдоль оси ондулятора по зубчатому ремню, рис.5.

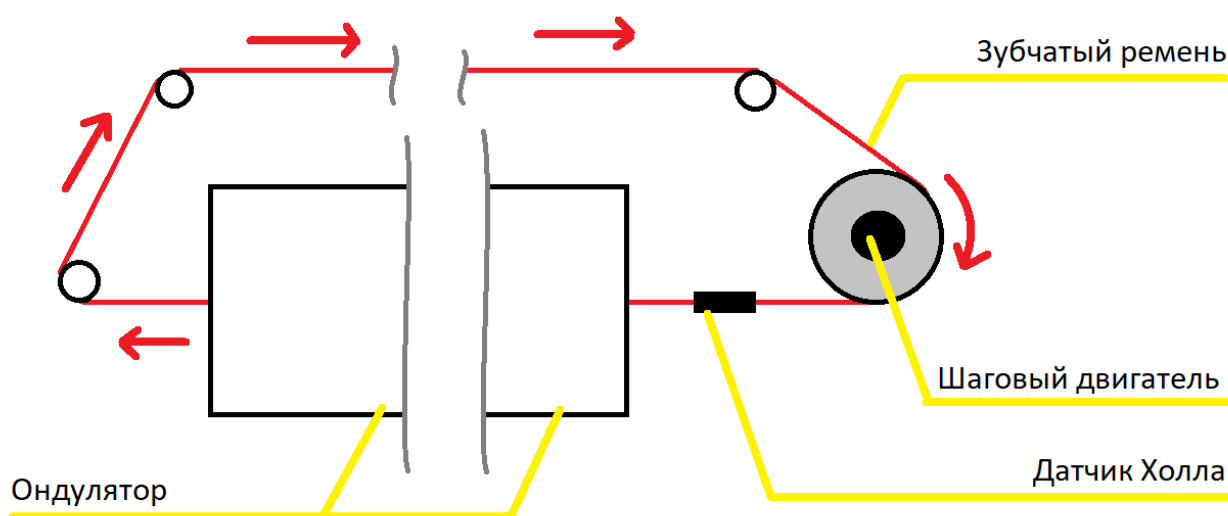


Рис. 5. Схема стенда измерения магнитного поля.

Такая конструкция позволяет получить значения поля на оси с шагом 0,1 мм. Сам датчик содержит 5, помещенных в корпус, полупроводниковых датчиков Холла, расположенных на прямой вдоль горизонтальной оси с промежутком в 7 мм. между каждым. Это позволит убедиться в симметрии поля и получить характерную зависимость поля от перпендикулярных отклонений для

дальнейшего моделирования трехмерной картины поля. Для получения полной картины поля из дискретных значений была использована аппроксимация полиномиальными функциями.

Обработка данных

Моделирование системы основано на дифференциальной форме уравнения движения электрона (2):

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{e}{c} [\vec{v} \times \vec{B}], \quad (2)$$

которое простыми операциями (3), (4), (5) преобразовывается в удобный вид, для работы с нашей установкой (6):

$$\frac{dp_x}{dt} = -\frac{e}{c} v_z B_y \quad (3)$$

$$\frac{d}{dz} \frac{p_x}{p_0} = -\frac{e}{p_0 c} B_y \quad (4)$$

$$\sin(\alpha) = \frac{p_x}{p_0} \approx \frac{dx}{dz}, \quad \alpha \ll 1 \quad (5)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} x = -\frac{e}{p_0 c} B_y. \quad (6)$$

При изучении излучение нашей установки в разбиении по Гауссовым модам, критерием корректности работы ондулятора будет длина Релея, так как эта характеристика напрямую влияет на количество излучения, сохраняющегося в резонаторе, при многократных отражениях. Конечной целью компенсации является минимизация длины Релея для повышения мощности лазер. Для дальнейшего моделирования трехмерной системы, расчета аппроксимирующих функций и второго интеграла дифференциального уравнения был использован программный пакет Mathcad.

Компенсация краевого эффекта в ондуляторе Новосибирского лазера на свободных электронах.

На вторую очередь Новосибирского ЛСЭ был сконструирован и изготовлен ондулятор на постоянных магнитах. Перед установкой ондулятора на ЛСЭ необходима небольшая корректировка его характеристик. При помощи

установки, описанной выше, были проведены измерения магнитного поля в ондуляторе. После получения результатов, показывающих большое отклонение пучка, были проведены компенсационные работы, а именно: ослабление первого кластера магнитов термическим способом в 2 раза от номинального значения намагниченности и установка экрана рис. 6 из магнитомягкого материала. Результаты измерений приведены ниже.

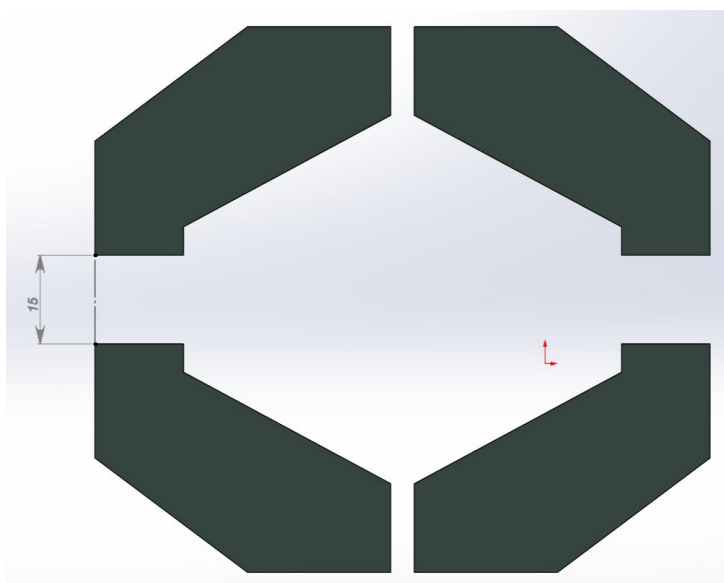


Рис. 6. Схематичное изображение магнитного экрана.

Результат до компенсации

На графике 1 изображен результат моделирования пучка на установке без компенсаций.

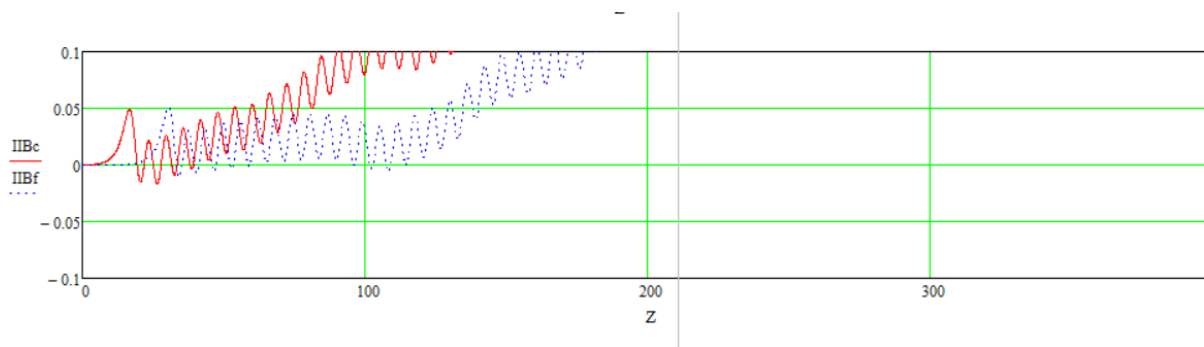


График. 1. Траектория движения. Без компенсаций.

Красным цветом помечена траектория движения пучка электронов, полученная интегрированием уравнения движения (6). Из графика 1 видно, что пучок испытывает сильное отклонение от оси. Задача компенсации обусловлена минимизированием этого отклонения от оси распространения пучка.

Результаты после компенсации

На графике 2 изображено моделирование пучка после произведенной термической компенсации. На графиках 3 и 4 представлена траектория, полученная с использованием экрана из магнитомягкого материала с зазорами 4 мм и 15 мм соответственно. Все графики приведены для максимального периода ондулятора, для получения максимальных отклонений пучка и наибольшей наглядности.

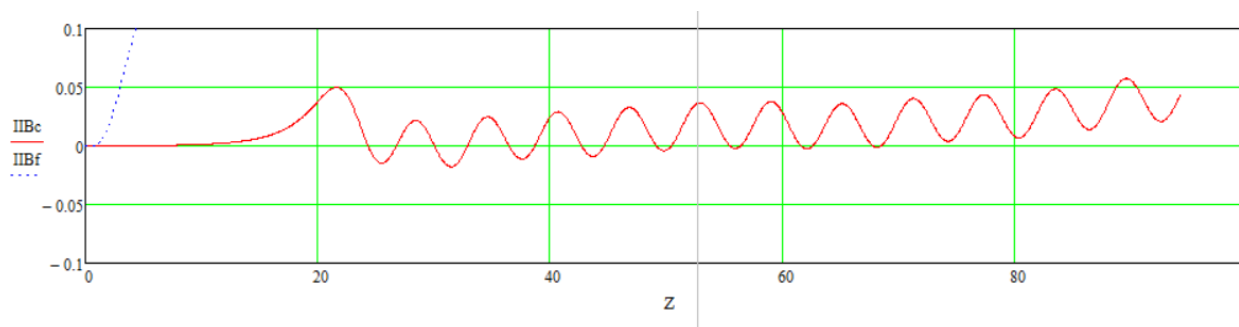


График. 2. Траектория движения. Термическая компенсация

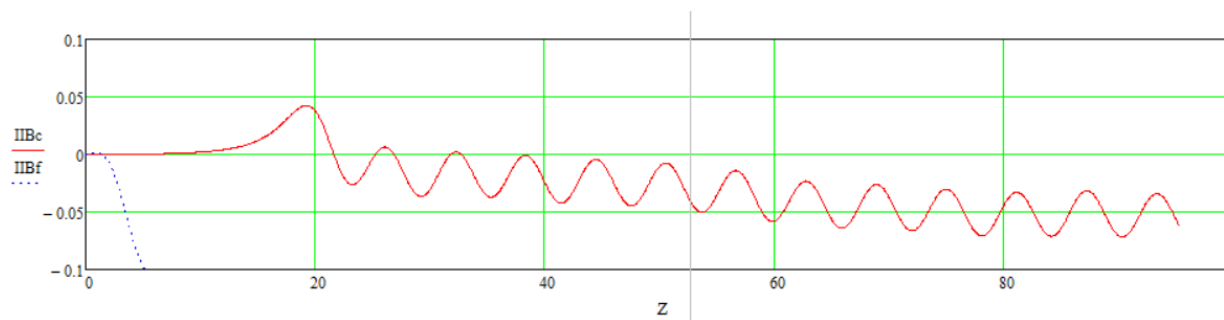


График. 3. Траектория движения. Термическая компенсация. Пластина 4мм.

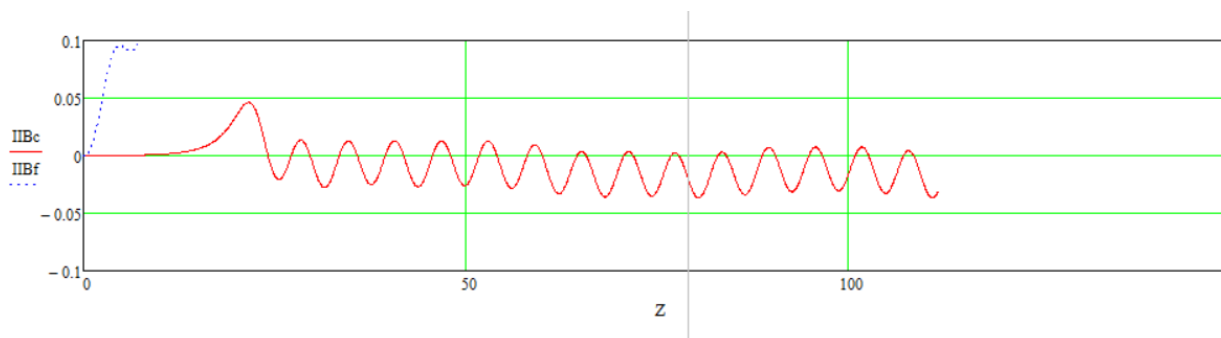


График. 4. Траектория движения. Термическая компенсация. Пластина 15мм.

Заключение

Из графиков 2, 3 и 4 видно, что корректировкой, при помощи ослабления магнитов, были значительно уменьшены отклонения электронного пучка, а тонкая настройка подкладками с различными зазорами позволила точно центрировать траекторию. Таким образом, компенсацией краевых эффектов было проведено уменьшение краевых отклонений. Полученное с помощью откалиброванного ондулятора излучение будет значительно эффективней отражаться в резонаторе, что увеличит выходную мощность Новосибирского лазера на свободных электронах.

Список используемой литературы

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 2. Теория поля: Учеб. Пособие для студентов вузов. – 7-е изд., испр. - М.: Наука, 1988.
2. Undulators and Other Insertion Devices. Eugene Levichev and Nikolay Vinokurov. Budker Institute of Nuclear Physics. DOI: 10.1142/S1793626810000403

Приложение

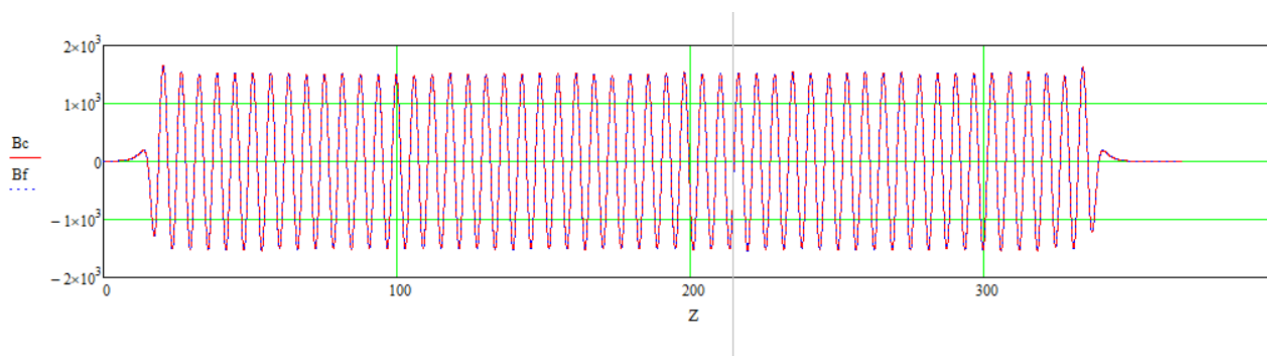


График. 5. Поле без обработки. Без компенсаций.

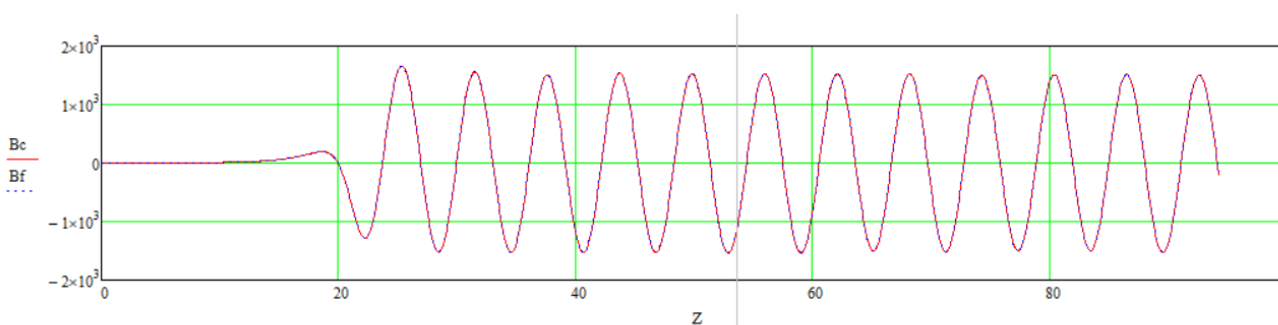


График. 6. Поле без обработки. Термическая компенсация.

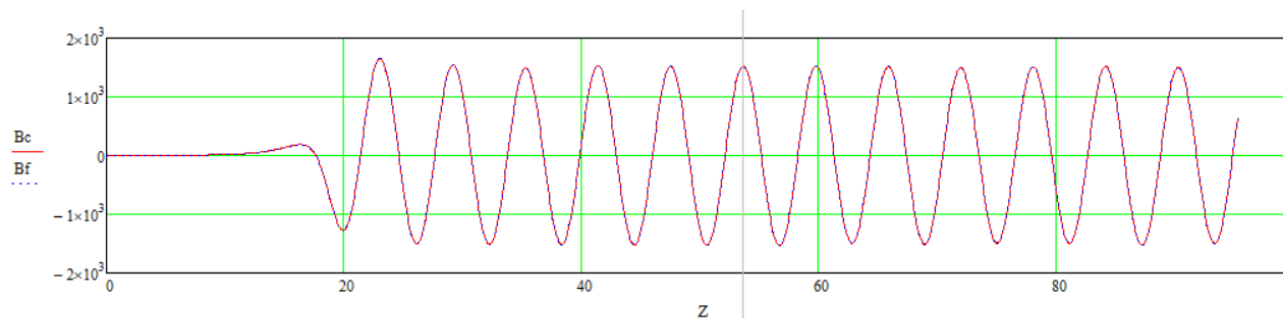


График. 7. Поле без обработки. Термическая компенсация. Пластина с зазором 4мм.

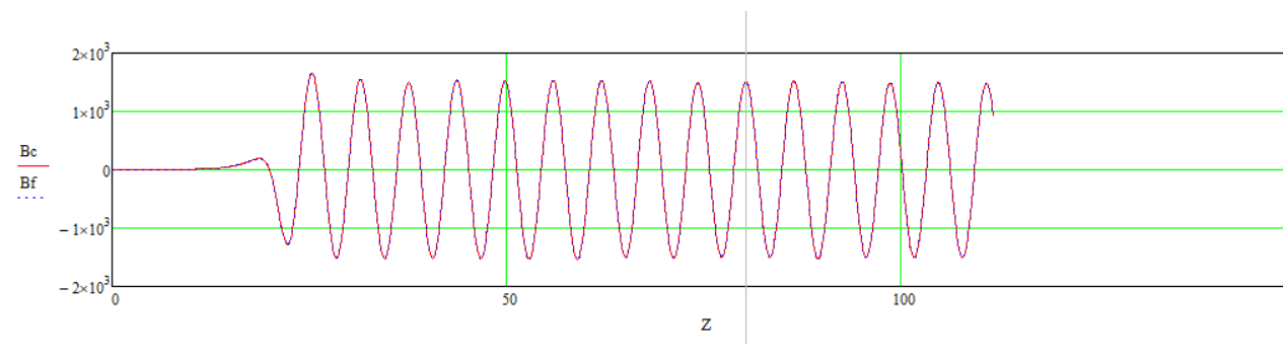


График. 8. Поле без обработки. Термическая компенсация. Пластина с зазором 15мм.